



Title	コンクリート構造物およびアスファルト舗装等の極微量有機物による損傷（中編）
Author(s)	森吉, 昭博
Citation	月刊建築仕上技術, 47(564), 24-32
Issue Date	2022-07-15
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/86551">https://hdl.handle.net/2115/86551</a>
Type	journal article
File Information	moriyoshi_July.pdf



# コンクリート構造物および アスファルト舗装等の 極微量有機物による損傷（中編）

北海道大学名誉教授 森吉 昭博

## 目次

（前編）

1. コンクリート構造物の砂利化現象との出会い
2. 車両のウインドシールドウォッシュ液 (SPNES)
3. 黒い汚染物質

（中編）

4. アスファルト舗装とウインドウォッシュ液 (SPNES) との関係
5. アスファルト舗装の高温時の亀裂
6. フタル酸エステル化合物
7. コンクリート中のリン酸化合物

（後編）

8. 樹木の有機物汚染
9. コンクリートの砂利化現象
10. 砂利化の原因
11. コンクリートのミキサー車およびバイブレータと砂利化
12. 砂層の液状化防止（泡の制御方法）
13. 今後の展望
14. まとめ

※前編は6月号に掲載。後編は8月号に掲載予定

## 4. アスファルト舗装とウインドウォッシュ液 (SPNES) との関係

ウインドウォッシュ液中のSPNES (Sodium Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether Sulfate) は陰イオン系界面活性剤であるためアスファルト舗装の表面に落下するとアスファルト舗装中のアスファルト成分を溶解し、水溶性のアスファルト (アスファルト乳剤) になる。しかも、この物質はアスファルト舗装上にあるため、走行車両のタイヤによって乾湿を問わず、大気中に大変細かい粒子として巻き上げられ、アスファルト舗装の表面だけでなく、大量に大気中にも浮遊している。このため、この物質はアスファルト舗装の横断亀裂部からアスファルト層 (表層、基層、アスファルト安定処理層) の亀裂部の隙間を介して、粒状路盤や路床土に大量に雨水と一緒にアスファルト舗装中に浸透する。この水溶性アスファルトはアスファルト舗装の深さ1.2m以上の路床層まで浸透し、その過程で黒い物質が亀裂部の粒状層の側面に付着する。この黒い筋はアスファルト舗装の亀裂部の切削断面で幅1cm程度になって、黒く鉛直方向に筋状になっていることが現場で観測された。一方、アスファルト舗装の亀裂部の底面ではアスファルト舗装中の表層、基層およびアスファルト安定処理層のアスファ

ルトが溶出し、粒状層が平面的に黒くなっているが、亀裂部のアスファルト舗装の断面では黒いアスファルト分が全く見当たらない (アスファルト舗装の砂利化)。しかし、SPNESの若干良いところはSPNESの浸透のために寒冷地では粒状層の局所的な凍結 (凍上) が妨げている。この現象はこの黒い筋状の部分の土を採取して北海道の寒地土木研究所の凍上試験機で凍上試験を実施すると、凍上量が極めて小さいことが確認された。これは土の中に含まれる陰イオン界面活性剤のSPNESが局所的な路盤の凍上を防いでいるためである。

このアスファルト舗装の横断亀裂部—寒冷地ではアスファルト舗装は冬季の寒さのため、横断方向に直線的な亀裂 (アスファルト表層、基層、およびアスファルト処理層が同時に一緒になって同じ位置に碎石も破砕して脆性破壊した亀裂)—が発生する。この亀裂付近のアスファルト舗装の底部にある粒状路盤では、開削するとこの横断亀裂部を挟んで前後で約4mに亘り、路盤や路床土の含水率が大きくなっていった。これは亀裂付近の粒状路盤ではこの界面活性剤を含む水は浸透性が良いこと、また横断亀裂部は走行車両によりアスファルト舗装の表面が以下で示すように若干沈下する為、またアスファルト舗装は若干縦断勾配があるため、舗装表面のSPNESを含んだ水が溝のようになった横断亀裂部から粒状路盤に多

表1 アスファルト舗装の横断亀裂部の粒状層の性状

		最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最適含水比 (%)	自然含水比 (%)	凍上率 (%)	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	PL (%)
下層 路盤	亀裂広	2.191	9.2	5.1	33.5	2.159	—	—
	亀裂狭	2.247	8.6	5.3	28.0	2.161	—	—
	亀裂無し	2.270	9.1	5.2	31.2	2.591	—	—
凍上 抑制層	亀裂広	0.942	42.0	47.0	5.6	—	—	—
	亀裂狭	0.935	46.5	50.5	9.6	—	—	—
	亀裂無し	0.992	41.0	50.9	15.5	—	—	—
路床	亀裂広	1.309	29.4	25.8	113.1	—	42.3	NP
	亀裂狭	1.787	17.3	25.0	98.3	—	27.7	30.1
	亀裂無し	1.527	21.3	21.7	106.8	—	39.3	NP

量に浸透し、亀裂部の前後で広範囲に水が浸透して粒状路盤層の含水率が大きくなり、路盤の支持力が低下したためである。

また、アスファルト舗装の横断亀裂部に一旦雨水が浸透すると、アスファルト層の底部は全面的に剥離し、界面が空洞化して亀裂部は動きやすくなる。これは路盤上(アスファルト安定処理層の底面)に塗布し、アスファルト舗装の底面と路盤との接着を考えた「陽イオン系のアスファルト乳剤」の黒いプライムコートがSPNES(陰イオン系界面活性剤)で簡単に分解され、溶解するためである。このため、走行車両の移動荷重により、亀裂部の底部に溜まった空洞部の水は主に走行車両の進行方向に向かって、車両の重量により、アスファルト舗装の底部で勢よくジェット水流のように押し出される。このため、アスファルト舗装の横断亀裂部付近の底面は一層激しく損傷する。

表1は横断亀裂部で採取した粒状路盤層および凍上抑制層(路盤層の下の凍上抑制層)、路床層の含水比、凍上率等を示す。

この横断亀裂部の粒状層、凍上抑制層および路床土のすべての層からSPNESが検出された。これより路盤層の含水率が表1で2%以上と大きな原因は舗装の横断亀裂部からSPNESを含んだ浸透性の良い雨水が舗装体の内部に大量に浸透したためである。この路盤層の含水率はこの亀裂前後の4mの範囲まで変化し、アスファルト舗装の底部にあった路盤上のプライムコート(陽イオン系アスファルト乳剤)はすべて陰イオン系のSPNESによって分解して、溶解し、アスファルト舗装は砂利化していた。このため、この亀裂を挟んで、図1のように経年経過とともに横断亀裂部を中心としてアスファルト舗装の表面の変形(沈下)も亀裂部の垂直方向の落ち込みの断面積もが経過時間と共に大きくなる。しかし、この図

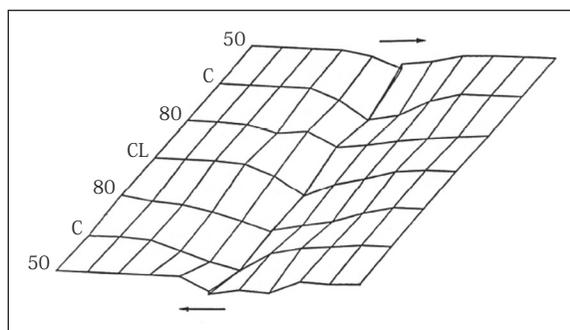


図1 アスファルト舗装の横断亀裂部の局所的な舗装表面(2車線)の変形状(国道)。矢印は車両の走行方向を示す。数字(C)は大型車のタイヤの走行軌跡の箇所を示す。

から車両走行軌跡部分でないアスファルト舗装のセンターラインでも舗装表面が変形(沈下)している。この現象からアスファルト層の底部は2次的に広い範囲で剥離していることを示している。

この状態でアスファルト舗装の表層の上に3-4cmの厚さのアスファルト混合物でオーバーレイ層を施工しても、オーバーレイ層には元の横断亀裂部の真上となる新設の舗装表層に施工後、すぐ同じ形の横断亀裂が発生する。オーバーレイ工事の施工中および施工後に赤外線カメラでこの亀裂部付近を観察すると、施工直後の新設のオーバーレイ層には旧アスファルト舗装が存在した横断亀裂の箇所の上に直線的な低い温度が線状に観察された。これはオーバーレイの施工中に旧舗装や路盤が亀裂部付近で局部的に動いて、新設のオーバーレイ層にすでに亀裂が発生したことを示している。

このため、この横断亀裂を挟んで亀裂の手前と向こう側についてアスファルト舗装を局部的に剥がして路盤材の路盤支持力を表す試験、平板載荷試験を行った。それから支持力値、K値を測定すると、K値は新設時で3MPa/cm<sup>2</sup>であるのに対して横断亀裂の前後の両側で

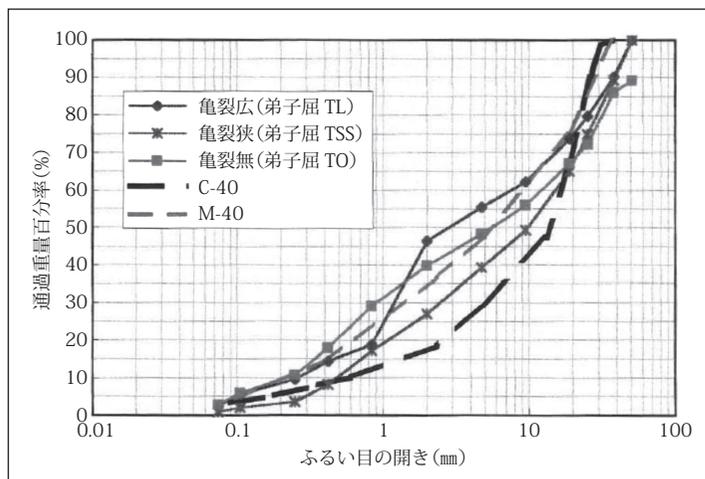


図2 横断亀裂部の粒状路盤層の粒度曲線と亀裂の関係

ば0.6–0.8MPa/cm<sup>2</sup>となっていた。これは後で述べるように横断亀裂部で舗装の支持力が局部的に低下し、アスファルト舗装の表面のみが局部的に沈下したのではなく、横断亀裂付近の路盤材の中の細かい粒子が局部的に下部に沈降し、路盤が圧密されたのが原因である。

この舗装表面の変形は横断亀裂部を挟んで車両走行の手前と向こう側のアスファルト舗装の「亀裂前後1 mの間の最大の垂直方向の落ち込み：沈下量」を調べると、亀裂部の向こう側の局部変形が大きくなっていった。これは車両走行により、アスファルト層と路盤層の境界に空洞があるため、この横断亀裂部の向かい側は車両により衝撃を受けてアスファルト層が局部的に変形するためである。横断亀裂が発生すると、アスファルト舗装は走行車両に乗っていると、この横断亀裂部の段差(ガタ)のために、車は時速40km/hで走行しても横断亀裂部の付近で若干の衝撃を感じる。

この衝撃は横断亀裂部の段差(ガタ：最大沈下量)が3mm以上であれば、いつもこの衝撃が感じられる。

図2は同じ箇所でも横断亀裂の亀裂幅が変化した箇所および全く亀裂がない箇所の路盤層の粒度と亀裂幅を示す。

これより、弟子屈地区の粒状路盤は後で示す、M-40の粒調砕石だったと推測された。この路盤は浸透したSPNESを含んだ雨水で簡単にこのように局部的に粒度まで変化し、また粒度的に路盤が動きやすいため、車両の移動荷重で路盤が次第に局部的に変形する。

これらのアスファルト舗装の亀裂部の落ち込み量(断面積)の測定は以下のように行った。弟子屈地区のアス

表2 弟子屈地区のアスファルト舗装の亀裂付近の表面の落ち込み量(最大沈下量)とその落ち込みの断面積

	沈下量 (cm)	断面積 (cm <sup>2</sup> )
広 (TL)	1 cm以上	30.17
狭 (TSS)	0.25	6.97

ファルト舗装の亀裂部の表面の垂直方向の落ち込み量を長さ1 mの直の鋼製の定規で目盛りが付いた側を舗装の表面に向けて鋼尺を横に立てて、この鋼尺と舗装の間の隙間(これを舗装の落ち込みと定義する)を別のメジャーで鋼尺と舗装表面の間の隙間の量を亀裂部の落ち込み量として鋼尺の長さ1 mの範囲でその量を測定した。アスファルト

舗装は冬季間に収縮し亀裂幅が広くなり、夏季では同じ亀裂幅で狭くなり、経過年数と共にこの亀裂幅は次第に広がる。このような亀裂幅が変化し、亀裂幅が次第に広がるのは冬季中にアスファルト舗装の亀裂部が収縮し、そのときの引張応力がアスファルトの応力緩和現象で次第にその応力がなくなるため、亀裂幅が次第に広がったのが原因である。

表2は弟子屈地区に横断亀裂で亀裂幅が異なる場合の最大沈下量および断面積を示す。

これより、横断亀裂の亀裂幅が広くなると、最大沈下量および断面積も大きくなる。

図2でM-40は粒度調整路盤(表面の平坦性が良い路盤で碎石のかみ合わせが良くない)で、C-40はクラッシュラン(碎石のかみ合わせが良い路盤)の粒状路盤を示す。横断亀裂部の舗装表面の沈下量は横断亀裂部直下の最大変形量(沈下量)、断面積は長さ1 mの鋼尺を用いた鋼尺からアスファルト舗装表面までの舗装の落ち込みの断面積を示す。横断亀裂部の路盤層の粒度はSPNESを含む雨水の浸透により、路盤の粒度分布が局部的に荒く(粒度曲線が若干下側に变化)変化する。この路盤粒度が元の粒度曲線から局部的に荒い方向に変化することを私は粒状層の「砂利化」と呼んでいる。この粒度が変化する現象は路盤材の細かい粒子が横断亀裂に浸透したSPNESを含む水のために粒状路盤層の中にあつた細かい粒度の粒状物がさらに下側に流れ落ちる、いわゆる路盤材の濾過(Percolation)が発生したためである。

ここでM-40の路盤は碎石のかみ合わせが良くない粒度のため、走行車両により、路盤層はアスファルト混合物の流動現象と同じように簡単に舗装表面は流動したよ

うに変形する。しかし、C-40は砕石のかみ合わせが良い粒度のため、粒状路盤が走行荷重で変形(移動)しないため、この舗装の表面の変形量は著しく小さくなる。このため、札幌-千歳の高速道路の路盤(第3工事:千歳側)の1部にM-40を使った区間(第3工事:千歳側の区間)は施工後30年間の舗装の「表面の轍掘れ」の補修費用が他のクラッシャーラン(C-40)で築造したその隣の2つの区間より30%以上多かった。この補修費はこれからも益々増えると思われる。図2の3区間では2.36mm篩の通過量が通常のクラッシャーラン(C-40)の27%から、粒調砕石(M-40)の33%となっていた。この僅かな粒度の違いがこのような補修費の増大となっている。長寿命でかつ路盤層が全く「流動」していない50年経過の国道36号線の路盤層の2.36mm篩の通過量は10%である。

これより、M-40の砕石を粒状路盤に使うと、初期の路盤の仕上りの表面は平となり、アスファルト舗装施工時のアスファルト混合物の路盤内への食い込み量が少なくなる。しかし、アスファルト舗装の表面変形は路盤の砕石が時間と共に車両走行の移動荷重で流動変形し、砕石がアスファルト舗装の「流動」と同じ現象を示す。このため、M-40の舗装区間は舗装施工後でも常にアスファルト舗装表面の「轍掘れの補修」が必要である。

図3、図4は横断亀裂発生したときの陸別地区のアスファルト舗装表面の亀裂を5年前と5年後で比較した。ここではアスファルト舗装に横断亀裂がこのような多数発生したため、横断亀裂部の下面の旧路盤層は全く置き換えることなく、アスファルト舗装を亀裂のある旧アスファルト舗装上に2層のオーバーレイ(4cmの2層)をした。これより、アスファルト舗装に横断亀裂が発生した箇所ですらアスファルト舗装のオーバーレイ工事をして横断亀裂の補修をしても、オーバーレイ層にはすぐ亀裂が多く発生する。

この原因は横断亀裂部の下層路盤の支持力が亀裂部付近で局部的に低下していること、粒状路盤とアスファルト層との間が空洞化していること、またアスファルト舗装の亀裂は外気温の高い夏季にアスファルト混合物中の砕石が移動荷重により大きく動きやすくなるため(アスファルト混合物の引張時の破壊ひずみ(0.7%)を超える)、亀裂付近では様々な亀裂がアスファルト層に多発する。また、この亀裂は夏季の高温が長く続くような場合、舗装温度が高温になるため、移動荷重によるアスファルト層の局部的な亀裂が夏季に増える。しかし、この亀裂は高温時に見えないため、高温時に発生した亀裂がア



図3 アスファルト舗装の横断亀裂が発生した箇所(向こう側)と手前の発生していない箇所(陸別)



図4 図3と同じ舗装箇所の5年後のオーバーレイ後の舗装表面の亀裂(写真の向きは図3と反対)(陸別)

スファルト舗装の亀裂として冬季の寒さによる収縮時に明確に現れる。すなわち、横断亀裂部付近の亀裂は冬季ではなく夏季に発生する。

アスファルト舗装が高温で亀裂が発生する現象は以下のように確認した。

新設の排水性舗装の高速道路から幅30cm、奥行き25cmとしてアスファルト表層(排水性舗装:空隙率15%)、基層およびアスファルト安定処理層の3層系の試料を一体として切り出した。この試料に対して、表面45℃、アスファルト安定処理層の底部温度を30℃として、夏季の舗装状態を室内で再現した。この試料を使って北大式ホイールトラッキング試験(表面45℃、底部30℃、42回/分、5.2MPa)の条件で3層系の走行試験を実施し、この時型枠の1側面が透明なガラス越しにこの3層試料の断面をARAMISという装置(カメラ)で側面の細かい動きや各種ひずみを測定した(Moriyoshi, Construction and Building Materials, 40,1128-1135,(2013))。これより新設の3層の混合物のすべての層で車輪走行が

1回ですでに局部的に内部には0.7%の引張の限界ひずみ(亀裂)を超えるひずみが多発発生した。この限界ひずみ(0.7%)の大きさは排水性アスファルト、アトレートアスファルトを使用した混合物ですべて同じ値である。アスファルト混合物の高温時の亀裂は以下の5. で再度述べる。

図3のアスファルト舗装において厚さ4cmのオーバーレイ層を2層、上部に舗装したが、それでも新設のオーバーレイ層には亀裂が多発発生した。(図4参照)

アスファルト舗装の横断亀裂部のアスファルト舗装、路盤材、凍上抑制層、路床土を掘削して、これらの化学分析をすると、これらのすべて粒状層からSPNESが検出された。

これより路盤層では路盤の含水率が大きくなると走行車両の重量により、路盤材が局部的に圧密沈下する。これによってアスファルト舗装はこの亀裂前後の付近に新しい亀裂が発生する。これが寒冷地でよく見られる、1本の横断亀裂が経過年数とともに1本の亀裂の横断亀裂部の前後でネット状の亀裂に進展する原因である。これはアスファルト舗装の構造設計では最初から舗装表面の水がアスファルト舗装構造の内部に多量に浸透することは一切考慮されていないためである。このため、旭川の屋外でのオーバーレイの実験では横断亀裂部にアスファルト舗装のオーバーレイをしたとき、亀裂が発生するいわゆる「リフレクションクラック」の原因を検討するため、横断亀裂部の落ち込みがほとんどない舗装区間を選定した。ここでは横断亀裂の間隔が約20mのアスファルト舗装に対して厚さ4cmのオーバーレイをしても、旭川の実験では、横断亀裂部に何も処理しない場合、旧舗装の横断亀裂部と同じ箇所再度同じ形の横断亀裂(「リフレクションクラック」)が発生した。この原因はアスファルト層の下面と路盤層の間にすでに空洞があるためである。この亀裂「リフレクションクラック」の対策工法としては横断亀裂部のアスファルト舗装の下部の粒状路盤層を60cm深さまで新しい路盤材に置き換えるとこの横断亀裂(リフレクションクラック)は同じ箇所に発生しなかった。しかし、30cmの路盤材の置き換えでは再度同じ箇所に横断亀裂(リフレクションクラック)が発生した。この実験からアスファルト舗装の横断亀裂部の落ち込みがほとんどない場合でも路盤がかなり損傷していることを示している。

これよりアスファルト舗装の横断亀裂部の補修はいつたん亀裂が発生すると、この亀裂を防ぐ(リフレクシ

ョンクラックを防ぐ)ことや補修することは極めて困難である。旭川の工事では横断亀裂の亀裂間隔が約20mの場合で、路盤が損傷していないと思われる舗装でも、舗装の補修費は極めて高価になっている。横断亀裂部の亀裂の補修材を新たに開発するため、アスファルト舗装の横断亀裂部の幅が荷重や温度によりどのように変化するかを以下のように調査した。

このアスファルト舗装の横断亀裂部の幅の変化を10トンの輪荷重をこの亀裂の上部に載荷したときの横断亀裂部の動きより、舗装温度が20℃変化したときの亀裂幅の変化量の方が数段大きくなった。これはアスファルト舗装の横断亀裂部付近のアスファルト層の底面がすでに全面的に剥離し、亀裂部付近の舗装が温度変化で大変動きやすいことを示す。また1本の横断亀裂上での温度変化による亀裂幅を計測すると、横断亀裂の場所(舗装の端と中心部等)によって亀裂幅が変化して、この横断亀裂部の「亀裂幅の温度変化による亀裂幅の動き」は同じ横断亀裂でありながらこれらの横断亀裂幅の動き(左側、中央部、右側)は同じではなかった。これより横断亀裂部の亀裂の動きは1本の亀裂の延長線上だけでなく、別の横断亀裂の亀裂幅の動きも亀裂毎に全く異なっていた。これより横断亀裂部の亀裂の補修材の開発に苦勞し、結果として亀裂部に水分があっても補修材が付着し、かつ-20℃でも200%伸びるアスファルト系の新素材(サムアスファ)を開発した。アスファルト舗装の表面では1夏で水平方向に約3cm程度動いていることも確認した。

このアスファルト舗装中のアスファルトはウインドウオシヤで溶解した水溶性アスファルト(アスファルト乳化剤したアスファルト)に変化する。これが水を張った水田に流れ込むと、アスファルトの比重が1.02のため、アスファルトは水田の水の底に沈む。このため、水田はこの黒い物質が日光を集め(アスファルトの光吸収率は熱赤外線領域で特殊な装置で測定するとほぼ99%以上で、アスファルトは「真っ黒」に近い物質だった)、地温が局部的に上昇するため、この底面がアスファルトで黒くなった箇所では稲の発育がこの部分だけ異常に早いことを確認した。これは植物を育てるとき植物の上から黒いビニールマルチというビニールを架けると、雑草が生えないことと同じで植物が日光をよく吸収するため、地温が高くなり、植物の生育が早くなる。水溶性のアスファルトが流れ込んだ水田の底部(沈殿した箇所)ではこれと同じことが起こっていると思われた。水田の

「稲の成長する時期」で両者を比較すると、水田の水の底面にアスファルトが沈殿した箇所（稲の高さは、通常（水田の底が黒くなっていない箇所）の稲より30–40cm高く、かつ早く成長していた。

私はこの現象が単に水田の底の温度を上昇させているだけでなく、植物成長に対して好ましい光の波長がこの底部のアスファルトから放射されているためと信じている。

## 5. アスファルト舗装の高温時の亀裂

一般にアスファルト混合物の高温での車輪走行試験（ホイールトラッキング）は高温時の「流動現象」を調べる試験と言われている。しかし、新設の排水性舗装の高速道路のアスファルト舗装から切り取った3層系の試料（表層、基層、アスファルト安定処理層）を用意し、北大式ホイールトラッキング試験（5.2MPa）を表面45℃、試料の底部温度30℃で行った。このとき、高温時（表面45℃、舗装底部30℃）にアスファルト混合物は走行車両1台で新設の3層系のアスファルト舗装の表層（改質アスファルトの排水性混合物、空隙率：15%、ストレートアスファルトを使った基層およびアスファルト安定処理層）のすべての層にアスファルト混合物の限界の破壊ひずみで引張りが0.7%を超える箇所が局部的に多発した。特に基層部分に亀裂が多く発生し、1時間の車輪走行試験で基層部はほぼ0.7%以上の引張りひずみ（亀裂）が全面的に発生した。このため、第2層目の基層は1時間の走行、荷重5MPaで「疲労」したと思われる。

これより、高温のアスファルト混合物の走行試験はアスファルト混合物の「流動現象」を測定するものではなく、アスファルト混合物の亀裂現象を再現する「疲労試験」であると思われる。この疲労（亀裂）の確認は以下のように行った。アスファルト舗装の高温時の破壊現象「疲労」は北大式のホイールトラッキング試験とARAMISを使って、移動荷重の過程における舗装内部の変形量、せん断ひずみ、水平ひずみを「瞬時」に測定した。一方、アスファルト舗装やアスファルト混合物の内部亀裂状況はこの試料から小さな試料（2.5×2.5×8cm）を採取して、これに対してCTスキャナーを実施し、その後この画像について日本ビジュアルサイエンス社の3次元亀裂解析のソフトウェア（Moriyoshi, Construction and Building Materials, 40, 1128–1135, (2013)）を使い亀裂解析を実施した。この方法はこれらの試料の内部の亀裂幅

（0.01mm）、亀裂の位置、亀裂の長さ等を7色のカラーで表示可能である。

これより、3層系の層すべてで、車両走行の1時間経過後で水平ひずみが局部的に0.7%以上となる「亀裂」が発生し、ARAMISでの測定結果とCTで測定した亀裂幅は一致した。

このようにこの2つの手法を使えば、今まではアスファルト舗装の「表面の変形の大きさ」からアスファルト舗装の損傷の程度を評価していたが、アスファルト舗装内部の損傷を3次元亀裂状況として損傷を評価することができる。この手法はアスファルト舗装だけでなく、コンクリート試料に対しても亀裂や劣化を調べることが可能である。これを利用すると、今まではコンクリート構造物はコンクリートの「表面」の亀裂幅が0.2mmを超えると補修が必要と言われていた。しかし、アスファルト混合物およびコンクリートでも1本の亀裂をCTスキャナーで内部を計測すると、私は同じ1本の亀裂でも深さ方向で亀裂幅が異なっていることを見つけた。このため、これらの構造物の損傷を評価する場合、例えば試料全体（3次元）で0.2mm以上の亀裂幅をもつ亀裂の長さを使って、亀裂の程度（損傷の程度）を正確に評価できるようになった。（Moriyoshi A., PLOS ONE, 16(5), (2021)）。また、コンクリートでは劣化現象もこのCTスキャナーを使い、コンクリート内部の劣化の位置、大きさを正確に評価できるようになった。今まではコンクリートの亀裂も劣化も同じように考えていたが、この手法により、コンクリートの「亀裂」と「劣化」をそれぞれ別々に評価できるようになった。これを利用すると、補修深さ、劣化や亀裂の程度が正確に評価できるので、コンクリート構造物やアスファルト舗装の「現在の損傷状況：新設および既設」を正確に評価できるようになった。この解析方法からすべての新設のアスファルト舗装およびコンクリート構造物では完成時にすでに多くの亀裂や劣化があることが分かった。

## 6. フタル酸エステル化合物

フタル酸エステル化合物（フタル酸化合物）は主にDEHP（Di-n-(2-Ethyl-Hexyl)Phthalate）、DBP（Di-n-Butyl Phthalate）であり、これらは車両のタイヤやプラスチックの可塑剤として日本では年間60万トン以上が製造されている。これらはいずれも水には難溶性の油状性物質である。しかし、これらは極微量で難

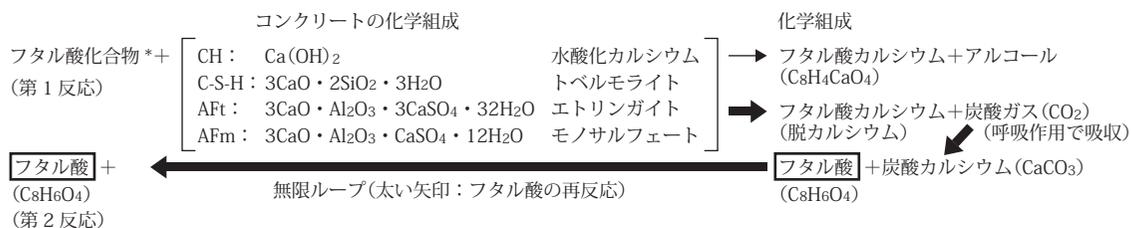


表3 フタル酸化合物のコンクリート中のフタル酸の再反応

水性だが水にも若干溶解する。DEHPの水に対する溶解度は41μg/Lである。

現在廃タイヤ、廃プラスチック、肉骨粉等がセメント製造時に燃料および素材として使用されている。セメントは製造時にセメント材料を加熱するセメントキルンの中の温度は1450℃の高温である。このため、これらの素材は完全に分解すると思われていた。廃タイヤ、廃プラスチック、骨粉肉の中にはDEHP、DBP、リン酸化合物が入っている。私は世界中の市販のセメント中にフタル酸エステル化合物が未燃焼で極微量残っていて、この微量(119μg/10gのセメント)の有機物がセメントに極めて害(亀裂や劣化)がある物質であることを見つけた。

しかも市販の世界中のセメント中にDEHPが僅か(119μg/10gのセメント)でもコンクリートの劣化や亀裂に著しい影響を与えていた(Moriyoshi A., PLOS ONE, 16(5),(2021))。なお、このフタル酸化合物は表3に示すようにセメント中の様々なカルシウム化合物と化学反応し、フタル酸カルシウムを生成する。(Tomoto, Building and Environment, 44(9), 2000-2005, (2009))。この過程で生成されたフタル酸は表3に示すようにセメント中のカルシウムとの化学反応は1回で収まらず、フタル酸がコンクリート中にある限り、炭酸ガスを介して、何回もこのカルシウムとの再反応が続く(表3の太い矢印の再反応)ことがコンクリートの損傷を評価するとき重要と思われた。この化学反応をまだ私は確認していないが、これが正しければ、このフタル酸化合物は大気中の炭酸ガスを吸収することで、極微量のフタル酸化合物による劣化をさらに進める極めて有害な物質であると言える。

新設のセメント中にこの極微量なフタル酸化合物の存在は以下のように確認することができる。

フタル酸化合物は極微量でもセメント中にあれば、そのセメントは水と混合すると、瞬時に嫌な匂い(2-Ethyl-

1-Hexanol: 2E1H)のガスが発生する。この匂いはDEHPが加水分解(脱カルシウム化)したとき発生する独特の匂いであるため、セメント中にこの物質が入っているかどうかはセメントと水を混合すると瞬時に確認できる。この匂いがあることは表3に示すように、セメント中のカルシウム成分がフタル酸カルシウムに変化し、コンクリートが「瞬時」に劣化(脱カルシウム化)することを示している。現在、この物質は極微量でもコンクリートの劣化および亀裂に極めて大きな影響を与えていることが分かった。このため、コンクリートミキサーの時間や打設時のパイプレータはコンクリートの性質に著しい影響(亀裂や劣化)を与えていると思われた。

このフタル酸化合物は空中にも多数存在する。空中にはアスファルト、ディーゼル排煙、擦り減ったタイヤ層中のフタル酸化合物が、多数空中に浮遊している。これらは大気中の湿気やSPNESとともに存在する。このため、コンクリート構造物が自身の呼吸作用を通じて、これらの物質を湿気と一緒に内部に取り込むと、コンクリートは簡単にかつ短時間で脱カルシウム化や亀裂が発生する。また、これらの粒子の大きさは1μm以下のため、ビニールシートも簡単に貫通する。従ってグラスウール断熱材はビニールで全面を覆っても湿気等はビニールシートも貫通する。このため、湿気、SPNES、フタル酸エステル化合物はグラスウール断熱材の表面に設置したビニールシートを簡単に貫通し、断熱材の内部の底部までに浸透し、これがグラスウールの相対的に低い温度となった底部で、時間と共に微量の有機物と湿気と一緒に水として溜まる。例えば、名古屋地区の夏季の温度と湿度を24時間のデータとして採取し、これを室内で再現した。このときグラスウール断熱材だけの1次元非定常透湿試験は以下の条件で実施した(Sasaki, J. of the Japan Petroleum Institute, 49(1),33- 37,(2006))。直径10cmのグラスウール断熱材(16K/m<sup>3</sup>)、厚さ12cmについて、24時間のこの非定常透湿試験を夏季の条件で

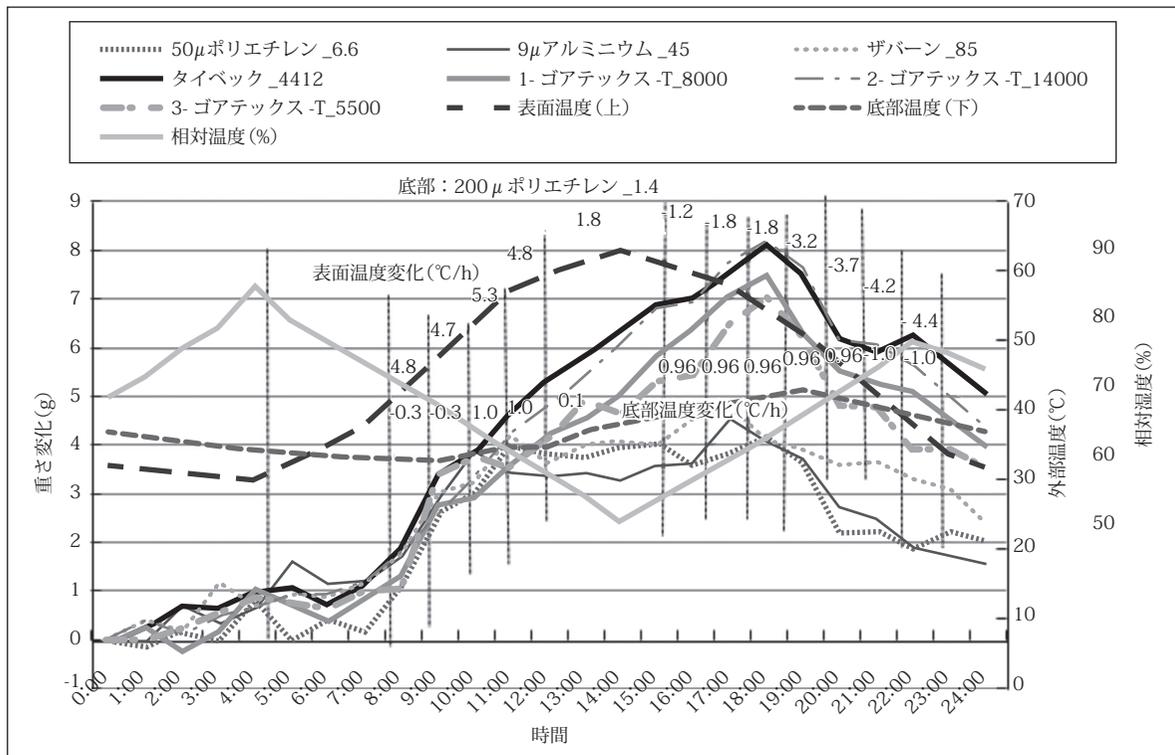


図5 底部のシート素材は厚さ200 $\mu$ mのポリエチレンシート(透湿度:1.4)とし、表面の素材(シート)を7種類(厚さ50 $\mu$ mのポリエチレン(透湿度:6.6)、厚さ9 $\mu$ mのアルミ蒸着シート(透湿度:45)、ザバーン(透湿度:85)、タイベック(透湿度:4412)、3種類のゴアテックス(透湿度:5500、8000、14000))に変化させたときの中空の塩ビ管内部の荷重変化(g:左側の縦軸)。ここで試料の表面温度、相対湿度および試料底部の温度も示す。

実施した。そして24時間後にグラスウール断熱材の中に溜まった水分量を測定した。その結果、グラスウール断熱材の表面近くでは0.034g、グラスウールの中央部で、0.023g、底部では0.868gの水分が検出された。この結果は直径10cmの試料でかつ1日(24時間)に貯留した水分量であるため、ひと夏を過ぎるとグラスウール断熱材は極めて多量の水分や大気中の有機物が次第に内部に溜まっていくことになる。

このため、この水分や有機物がグラスウールの断熱性状を著しく損なうことになる。

この非常透湿試験で使った夏季の名古屋地域の気象条件(温度および湿度(Relative humidity: %))は1日で図5のようになりに変化していた。この環境条件を使って、直径10cmの「中空」の塩化ビニール管(長さ:12cm)を立てて、管の表面の上部と底部に特定のシートを貼って「透湿試験」を実施し、荷重の変化量(g:左側の縦軸)を調べた。(表4参照)

結果を図5に示す。ここでは下部(底部)のシートはすべて同じシート(厚さ200 $\mu$ mのポリエチレン)とし、上

表4 シートの素材、透湿度(g/m<sup>2</sup>・24h)および荷重の増加量(g)

厚さと素材	透湿度(g/m <sup>2</sup> ・24h)	水分(g)
9 $\mu$ アルミ蒸着ポリエチレンフィルム	45	4.53
50 $\mu$ ポリエチレンフィルム	6.6	4.15
タイベック	4412	8.11
ザバーン	84.9	4.8
200 $\mu$ ポリエチレン	1.4	
ゴア1	8000	7.48
ゴア2	14000	8.2
ゴア3	5500	7.02

部表面のシートだけ素材を変化させた。

これより、透湿度が大きくなると試料の内部に溜まる湿気(水分)が大きくなり、この結果は一般に云われている、透湿度が大きければ内部に湿気や有機物が溜まらないという学説と矛盾している。この原因は試料表面のシートは粒の極微小な湿気は簡単に通過するが、この湿気が試料底部の低温で水分(水)となって試料内部のシートから抜けきれないことを示している。これは24時間の1回の試験だが、この実験を繰り返すと試料の内部に

次第に湿気だけではなく、水分(水)や有機物も溜まることが確認されている。

また、底部の素材(ポリエチレンシート(透湿度:1.4))を透湿度の大きな素材(ザバーン:透湿度:85)に変更してもこの図5の傾向は変わらなかった。

このため住宅のグラスウール断熱材は湿気対策としてビニールシート等で全面を包んで施工している。しかし、グラスウール断熱材は経過年数とともに大気中のアスファルト、タイヤ、ディーゼル排煙、SPNESを内部に湿気(水分)と一緒に吸収するため、断熱材は黒くなり、かつ断熱材は吸収した水分の重さで次第に下にずり落ちる。

現状のJIS Z 0208の透過湿度試験では2つの箱(25℃、90%RHと40℃、90%RHT)の間を通過する湿気量(透湿度)を測定している。この試験法は実際の建物のグラスウール断熱材の条件(非定常の繰り返し試験)と試験方法のメカニズムが全く異なっており、このJISの試験法ではグラスウール断熱材の内部に溜まる湿気量(水分量)は測定できない。

## 7. コンクリート中のリン酸化合物

セメントは製造時に肉骨粉も素材の一部として使われている。この肉骨粉にはリン酸化合物が多量に入っており、セメント製造時に1450℃の高温で焼成してもこれがすべて完全に分解しない。このため市販の普通セメント中にはリン酸化合物が極微量の0.12%以上含有している。しかし、この量ではコンクリートの性質に影響がないとされている。現在CTスキャナーとコンクリート試料の3次元亀裂の詳細な解析が進むに連れ、以下のことが分かった。

AE減水剤はセメントに対して0.3%程度の有機物量である。これを使ってセメントモルタル試料を作成し、打設後30日でこれらの物質の「劣化の度合い:CTの2次元画像で薄い劣化を表す箇所割合」を表すDD Valueで両者(リン酸化合物とAE減水剤の影響)を比較した(Moriyoshi, PLOS ONE(2021))。

リン酸化合物(セメントの0.12%)とAE減水剤(セメントの0.3%)のDD Valueを比較すると、このDD値は各々3.1%, 4.5%となった。これより極微量のリン酸化合物(0.12%)もまたコンクリートの劣化や亀裂にも著しい影響を与えていた。AE減水剤をコンクリートに添加すると、AE減水剤は吸湿性が高いため、大気中の湿気やフ

タル酸エステル、およびウインドウオッシュ液(SPNES)を内部に瞬時に吸収する。このため、AE減水剤をコンクリートに使用すると、大気中の様々な有機物や湿気を瞬時に吸収し、またAE減水剤は通常陰イオン系の界面活性剤のため、セメントのカルシウム成分と化学反

応し、コンクリートの脱カルシウム化が進む。このため、AE減水剤を含んだコンクリート構造物は劣化や亀裂が短期間で多く発生する。このためAE減水剤を使ったコンクリートの寿命はAE減水剤を含まないコンクリートの寿命と比較すると極めて短くなっている。

市販の普通セメント中にフタル酸エステル化合物が極微量混入しているため、この物質を除去し、リン酸化合物だけのコンクリートへの影響を調べるため、このセメントを500℃で2時間加熱した。すべてのフタル酸エステル化合物は450℃程度で分解する。この加熱後のセメントを使ってコンクリートでパイプレータを使って型枠に打設し(直径12.5cm、長さ25cm)、表面から深さ2cmの部分切除して(亀裂が多いため)その下からコンクリート試料(2.5×2.5×6cm)を採取した。図6のCTの2次元画像より加熱前のコンクリートより加熱後の試料の亀裂が一段と亀裂が多くなり、最大亀裂幅は最大で2mmに達した。これは高温(1450℃)でリン酸化合物がポリリン酸という反応しやすい物質に変化したためである。

これよりセメント製造時に使っている肉骨粉は高温(1450℃)でリン酸化合物の一部がポリリン酸に変化し、これがコンクリートの亀裂や劣化に著しい影響を与えている。

図6により500℃の加熱セメントを使ったコンクリートは、加熱前のコンクリートの亀裂より一段と亀裂が多く、かつ亀裂幅も広がって、「リン酸化合物」の亀裂への影響が明確になった。

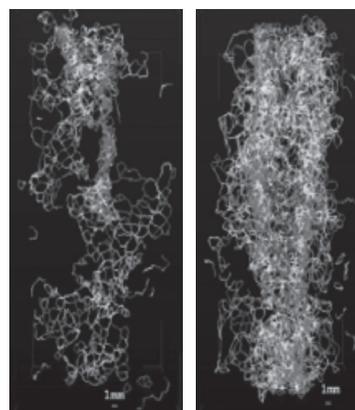


図6 セメント500℃加熱前後のコンクリートの亀裂状況